

# ぜい性砕料単粒子の破砕特性に基づくスクリーンミルとボールミル粉碎過程の解析

著者	橋本 等
号	988
発行年	1988
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/12006">http://hdl.handle.net/10097/12006</a>

氏 名	橋 本 等
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和63年4月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和52年3月 東北大学工学部化学工学科卒業
学 位 論 文 題 目	ぜい性砕料単粒子の破碎特性に基づくスクリーンミルと ボールミル粉碎過程の解析
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 八嶋 三郎 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 臼井進之助 東北大学教授 千田 信

## 論 文 内 容 要 旨

粉碎は主要な製造工業において用いられている重要な単位操作の1つであるが、その重要性にもかかわらず、学問的には長い間未開の分野であった。その理由は、粉碎に関わる要因があまりにも多く、理論化がきわめて困難なためであった。粉碎の理論的研究は約100年前から開始され、多くの粉碎理論が提案されてきたが、これらの理論は、粉碎過程を定量的に記述する、すなわち、粉碎時間による砕料の粒度分布の変化を記述することができず、不十分なものであった。

しかし、1970年代に粉碎過程を速度過程として数学的に記述する粉碎速度論が登場し、粉碎過程の定量的な記述が可能になった。粉碎過程を定量的に記述できるようになった意義はきわめて大きく、粉碎プロセス単独の制御や設計、最適化だけでなく、従来の理論では不可能であった粉碎プロセスを組み込んだ複合プロセス全体の制御や最適化も可能になった。この理論によれば、粉碎過程は物理的に明確な意味を持つ2つの速度論関数、すなわち選択関数と破壊分布関数を用いて記述することができる。速度論関数は物理的に明確な意味を持っているため、理論的に解析、導出することは可能であり、それは粉碎の基礎的研究においてきわめて重要な意義を持っている。一般に、速度論関数を実験的に決定するにはきわめて狭い粒子径範囲の試料を大量に必要とし、その準備には多大な労力と時間を要するため、多くの要因について検討を行うことは困難なことが多い。したがって、これを理論的に導出することができれば、多大な労力と時間を要する実験を伴わずに粉碎機構を解明することができる。しかし、現状では速度論関数は実験的に決定されるだけであり、理論的

な解析はほとんど行われていない。その理由の1つは、きわめて複雑かつ多様である粉碎現象をわずかに2つの速度論関数を用いて表すため、速度論関数に内包される要因がきわめて多く、その理論的解析が困難なためである。もう1つの理由は、固体の破壊現象には未解明な点が多いことである。

しかし、最近、速度論関数に対して理論的解析が試みられるようになって来た。田中は、速度論関数の理論的解析のための基本的な方針として粉碎機の機械的な機構と粒子の破壊機構とを切り離して考えなければならないと述べ、速度論関数の理論的解析における単粒子破碎研究の重要性を指摘した。Hayashiらは、この方針に従って転動ボールミルの粉碎機構を粒子に力の作用する機構と力の作用した粒子の破壊機構に分けて考え、粒子の破壊強度の粒子径依存性を考慮して選択関数の理論的導出を試みた。また、桑原は同様に振動ボールミル粉碎の選択関数の理論的導出を試み、実測の選択関数と良好に一致することを示した。さらに、最近になって種々の条件下におけるぜい性碎料単粒子の破碎特性も明らかになって来た。

そこで、本研究では粉碎機構の解明を目的として、広い視野からの速度論関数の理論的解析に欠かすことのできないぜい性碎料単粒子の破碎挙動の荷重速度依存性を実験的に明らかにすると共に、破碎挙動の粒子径依存性、材料力学的性質の荷重速度依存性、粒子が置かれた環境の破碎挙動に及ぼす影響を考慮して代表的な衝撃式粉碎機であるスクリーンミルの粉碎特性の理論的考察と汎用粉碎機である転動ボールミルの粉碎過程の理論的解析を試みた。

本論文は全編6章より構成されている。

第1章では、粉碎研究における粉碎速度論の重要性を指摘し、粉碎機構の解明につながる単粒子破碎研究の立場からの速度論関数の理論的解析の意義を述べた。さらに、本研究の必要性を指摘し、その方針と内容の概要を示した。

第2章では、広い視野からの速度論関数の理論的解析に欠かすことのできないぜい性碎料単粒子の破碎挙動の荷重速度依存性を実験的に明らかにした。2種類のガラス質試料と6種類の天然産岩石試料の球形試験片（直径2 cm、ソーダガラス試験片は直径1.64 cm）を用いて $10^{-1} \sim 10^3 \text{ N/s}$ の荷重速度範囲で単粒子の圧縮破碎実験を行い、単粒子の球圧壊強度、単位質量当たりの破碎エネルギー、新生比表面積、破碎表面エネルギー、破碎効率および破碎産物の粒度分布に及ぼす荷重速度の影響を調べ、荷重速度がぜい性碎料の破碎挙動に影響を及ぼす重要な因子の1つであることを示した。

まず、球圧壊強度と単位質量当たりの破碎エネルギーは荷重速度の増大に伴って増加する傾向を示すが、試験片に荷重が作用してから破壊荷重に達するまでの時間が試験片の固有振動の基本周期と同程度となる荷重速度下では特異な変化を示し、極小値を持つことを明らかにした。

つぎに、新生比表面積には固有周期近傍の荷重速度下でも特異な変化が認められず、荷重速度の増大に伴って一様に増加することを示した。その結果、固有周期近傍で破碎表面エネルギーが最小となり、その逆数である破碎効率が最大となることを明らかにした。これによって、粉碎機のエネルギー効率改善の可能性を示唆した。また、これらの破碎挙動の荷重速度依存性を実験式の形にまとめ、速度論関数の理論的解析に利用可能な形にして表示した。

第3章では、単粒子の破碎特性に基づいて代表的な衝撃式粉碎機であるスクリーンミルの粉碎特

性について考察した。

まず、スクリーンミルと真空容器を用いて常圧下と減圧下で粉碎実験を行い、常圧下に比較して減圧下では粉碎による新生比表面積が大となること、また碎料粒子径が小となるほど常圧下と減圧下の新生比表面積の差が大となり、減圧下ではより微粉碎が可能であることを示した。

つぎに、ミル内の粉碎過程を碎料粒子間衝突および粒子とハンマーの衝突によって粒子が圧縮破壊されるモデルによって表し、統計力学的手法を用いてミルに供給された粒子が粒子間衝突を起こすかハンマーと衝突するかについて考察を行った。そして、気流の影響による衝突速度の減少を考慮し、粒子の破壊強度の粒子径依存性と荷重速度依存性、粒子の材料力学的性質の荷重速度依存性、粒子の置かれた環境の破壊強度に及ぼす影響など単粒子の破碎特性に基づいて碎料粒子の破壊確率を計算し、実験結果との適合性を検討した。モデル計算の結果、常圧下、減圧下共に広い粒子径範囲で粒子の破壊確率が1となることを示し、常圧下に比較して減圧下で新生比表面積が大となることが空気抵抗による衝突速度の減少によるのではなく、粒子の破壊強度の環境依存性に起因することを実験結果との適合性から示唆した。また、粒子径が減少すると粒子の破壊確率も減少するが、減圧下では常圧下に比較して破壊確率が大となることを示し、減圧下でより微粉碎が可能であるという実験結果との適合性を示した。これによって、スクリーンミルの粉碎機構の一部を明らかにした。

第4章では、汎用ミルとして広範囲に用いられている転動ボールミル内で粉碎媒体によって碎料粒子に力が作用する機構を解明する目的で、荷重センサーを組み込んだ特殊転動ボールミルを試作し、粉碎媒体であるボールがミル壁面に衝突したときに発生する荷重を測定して、ボールの運動エネルギーを推算し、ボールの運動状態を解析した。

まず、ボールのミル壁面への衝突によって発生した荷重、すなわちボールの衝撃力からボールの運動エネルギーを推算する式を導いた。つぎに、ボールの衝撃力を測定するための荷重センサーを組み込んだ特殊転動ボールミルを試作し、これを用いてボールの衝撃力を測定してその運動エネルギーを推算し、ボールの運動状態を推定した。その結果から、ミル入力エネルギーからボールの衝突運動のエネルギーへの転換効率がきわめて低く、ミル内のボールの運動は衝突運動よりも摩擦運動が支配的であることを示唆した。

また、ボールの運動状態に影響を及ぼすと考えられるボール充てん率、ボール径、リフター高さおよびボール表面とミル壁面の摩擦係数の影響を検討し、ボール充てん率とリフター高さがボールの運動状態に影響することを示した。そして、ボール充てん率とリフター高さの増大に伴って、ボールの衝突エネルギーが増加し、エネルギー転換効率が改善されることを明らかにした。さらに、ボール表面およびミル壁面の摩擦係数がボールの運動状態に影響を及ぼすことを示し、摩擦係数が小さい場合にはミル入力エネルギーがボールに有効に伝達されなくなり、エネルギー転換効率が減少することを明らかにした。

第5章では、第4章における転動ボールミル内の粉碎媒体の運動状態の解析結果を用いて、ぜい性碎料単粒子の破碎特性に基づく粉碎過程の理論的解析を試みた。

まず、ミル壁面に垂直に衝突するボールとミル壁間に挟まれた碎料粒子が圧縮されて破碎される

モデルを考え、第4章の測定結果と圧縮力が作用した砕料粒子の破碎特性に基づいて、選択パラメータおよび破壊分布パラメータを計算した。

つぎに、粉碎速度論に基づく実験を行って選択パラメータおよび破壊分布パラメータを実測し、モデル計算結果と比較した。また、ボール充てん率、ボール径およびリフター高さが選択パラメータおよび破壊分布パラメータに及ぼす影響について実験結果とモデル計算結果を比較した。その結果から、選択関数、すなわち選択パラメータと粒子径の関係はモデル計算結果と実験結果共に細粒側では両対数グラフ上で直線的となること、および粗粒側では選択パラメータの増加傾向が減少傾向に転ずることを明らかにした。しかし、直線の傾きは異なること、また破壊分布パラメータは実験結果がモデル計算結果に比較して微粉成分が多くなること、さらにボール充てん率、ボール径およびリフターの影響についてはモデル計算と実験結果の良好な一致は見られないことを示し、ボールの衝突による粒子の圧縮破碎だけを考慮したモデルでは転動ボールミルの粉碎機構を完全には説明しきれないことを明らかにした。この結果と第4章の結果から、転動ボールミルの粉碎機構がボールの衝突による粒子の圧縮破碎よりもボール間およびボールとミル壁面の摩擦運動によって粒子に圧縮力と同時にせん断力が作用しての破碎が支配的であることを示唆した。

第6章は結論であり、各章の内容を要約して示した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

近時、粉碎速度論の進展に伴い、粉碎過程を速度論関数を用いて定量的に表すことが可能となってきたが、速度論関数は実験的に決定されるのみで、理論的な導出はほとんど行われていない。本論文は、速度論関数の解析に必要な碎料単粒子の破碎特性の荷重速度依存性を明らかにし、これに基づき代表的な粉碎機であるスクリーンミルと転動ボールミルの速度論関数の理論的導出を試み、粉碎系制御と粉碎成績評価に指針を与えたもので、全編6章より成る。

第1章は緒論であり、粉碎速度論関数の理論的導出の意義と研究の方針を述べている。

第2章では、8種類のぜい性碎料につき多数の球形試験片を用い広範囲な荷重速度下における圧縮破碎実験を行って単粒子破碎特性の荷重速度依存性を明らかにしている。荷重速度を次第に増大し、試験片の固有振動の基本周期と同程度の時間で破碎するようになると特異な破碎性を示し、破碎エネルギー効率が最大となることを見いだしている。これは著者が導いた重要な成果の1つである。

第3章では、スクリーンミルを用いて常圧下と減圧下で粉碎実験を行って、減圧下ではより粉碎成績が向上することを見いだしている。粉碎過程をミル内における粒子の衝突モデルで表して粒子の破碎特性に基づく破壊確率を求めて比べると、両者の相違を合理的に説明できると述べている。

第4章では、転動ボールミル内のボールの衝突運動のエネルギーを測定して、速度論関数の理論的導出の基礎となるボールの運動状態の解析を行い、転動ボールミルではボールの衝突運動と共に摩擦運動が粉碎に寄与することを明らかにしている。

第5章では、前章までの結果に基づいて行ったモデル計算結果と実験結果とを比べ、ボールミル粉碎は衝突圧縮破碎過程とせん断摩擦過程が共存する多様な粉碎過程を示すことを明らかにし、粉碎成績評価の指針を与えると共に単粒子せん断破碎特性研究の重要性を指摘している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、速度論関数の理論的導出に必要な単粒子の破碎特性の荷重速度依存性を明らかにし、これに基づきスクリーンミルと転動ボールミルの速度論関数の理論的導出を試み、粉碎系制御と粉碎成績評価に指針を与えたものであり、鉱物処理工学、化学工学ならびにこれらに関連する工業の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。